WWW.SCIAM-MAGAZINE.NAROD.RU

Нанотехнология: микроскопические подводные лодки, путешествующие по кровеносным сосудам и управляемые молекулярными компьютерами

А. К. ДЬЮДНИ

БУДУТ ЛИ когда-нибудь машины, размером с митохондрию, введены в организм человека? Если при одной мысли о том, что по вашим внутренностям будут ползать крошечные механизмы, вас пробивает озноб, то подумайте, какие зато открываются при этом возможности. Микроскопические машины в виде миниатюрных подводных лодок, бороздящих сосудистую систему, будут уничтожать вредные микроорганизмы или жировые частицы в крови человека и тем самым они смогут продлить вашу жизнь.

Такие исцеляющие машины в какой-то степени являются изобретением К. Эрика Дрекслера, работающего в рамках международного обмена учеными на факультете вычислительной техники в Станфордском университете. Вот уже более десяти лет Дрекслер разрабатывает основы нанотехнологии — революционной концепции построения машин, имеющих размеры порядка нанометра (одной миллиардной доли метра). Он сконструировал зубчатые передачи и подшипники атомных размеров и описал молекулярные манипуляторы. Он разработал даже логические схемы нанокомпьютера, описанию которого в основном и посвящена настоящая статья. И хотя нанотехнология пока завладела воображением лишь Дрекслера и еще нескольких энтузиастов, она, как видно по всему, несет на себе печать неизбежности. Будущее, которое она сулит, представляется более удивительным, чем любая научная фантастика.

Следует заметить, что Дрекслер не первый, кому пришла в голову мысль о нанотехнологии. В 1959 г. Фейнман описал последовательность машин все меньших и меньших размеров; на каждом уровне этой последовательности машины должны создавать себе подобных, но меньшего размера. По мнению Дрекслера, на последней ступеньке этой лестницы могут находиться механизмы, собранные из деталей размером не более нескольких атомов. Подобные изделия в зависимости от их конструкции и предназначения могли бы путешествовать по организму человека, проникая в раковые клетки и перестраивая их ДНК. Мириады других могли бы работать на стройке, облепив едва заметной металлической пленкой сооружаемое здание. В течение нескольких дней они могли бы завершить сооружение необычной изящной конструкции.

Дрекслер считает, что ключевым шагом в развитии нанотехнологии явилось бы создание машин-ассемблеров, маленьких механизмов, управляющих операциями химического соединения вступающих в реакцию молекул. Запрограммированные на выполнение определенных операций и работающие на миниатюрном сборочном конвейере ассемблеры могли бы создавать микроскопические машины заданной конструкции. Ежечасно такие фабрики размером не более песчинки могли бы выпускать со своих сборочных линий миллиарды машин, которые, подобно струйке пыли, выходили бы из фабричных ворот или в виде коллоидного раствора поступали бы в водную среду.

В природе уже существуют наномашины (своего рода), обитающие в водной среде. Вспомним, например, хорошо известный бактериофаг *T4*, который воспроизводит себя, проникая в тело бактерии. Бактериофаг прикрепляется к внешнему слою молекул бактерии и затем, подобно крошечному шприцу, впрыскивает в бактерию свою ДНК. ДНК фага перестраивает процесс синтеза белков в бактерии таким образом, что та начинает производить сотни микроскопических компонентов фага. За счет случайных столкновений эти компоненты соединяются друг с другом и образуют новые заряженные ДНК «шприцы», которые после того, как распадается оболочка бактериальной клетки, распространяются в поисках новых жертв.

Другим примером наномеханизма может служить отдельная часть некоторых бактерий, которые обладают так называемым жгутиком — длинным спиралевидным образованием, выступающим с одного или обеих концов бактериальной клетки. Такие микроорганизмы плавают, вращая своим жгутиком, подобно штопору. Жгутиком управляет своеобразный моторчик, находящийся под оболочкой бактерии. По существу этот моторчик представляет собой белковый ротор, вращаемый силами ионного взаимодействия.

Одним из важнейших компонентов любой мыслимой нанотехнологии является подшипник. Как правило, подшипники в той или иной форме требуют смазки. В 1959 г. Фейнман отмечал, что «говоря о смазке, следует иметь в виду некоторые интересные особенности. Эффективная вязкость масла должна быть все выше и выше по мере уменьшения размеров механизмов, в которых она используется... На самом деле можно обойтись вообще без смазки! Даже совершенно сухие подшипники не будут перегреваться, потому что тепло уходит из таких маленьких устройств очень и очень быстро».

Будет ли работать более легкая смазка? Даже если заменить масло керосином, вязкость все же будет возрастать. Однако, как отмечает Дрекслер, «в масштабах типичной наномашины молекула керосина скорее является физическим телом, нежели смазочным материалом». В своей статье, посвященной зубчатым передачам и подшипникам, он обращается к проблеме трения в роликовых подшипниках. Благодаря тому, что в структурах микроскопического масштаба необходимо учитывать взаимодействие между отдельными атомами, естественно ожидать, что в роликовых подшипниках нанометрового размера будут возникать значительные силы трения покоя и скольжения. Силы, действующие между атомами, частично могут быть описаны формулой потенциала взаимодействия Вандер-Ваальса. Эта формула содержит экспоненциальный член, описывающий бóльшую часть столкновений между атомами.

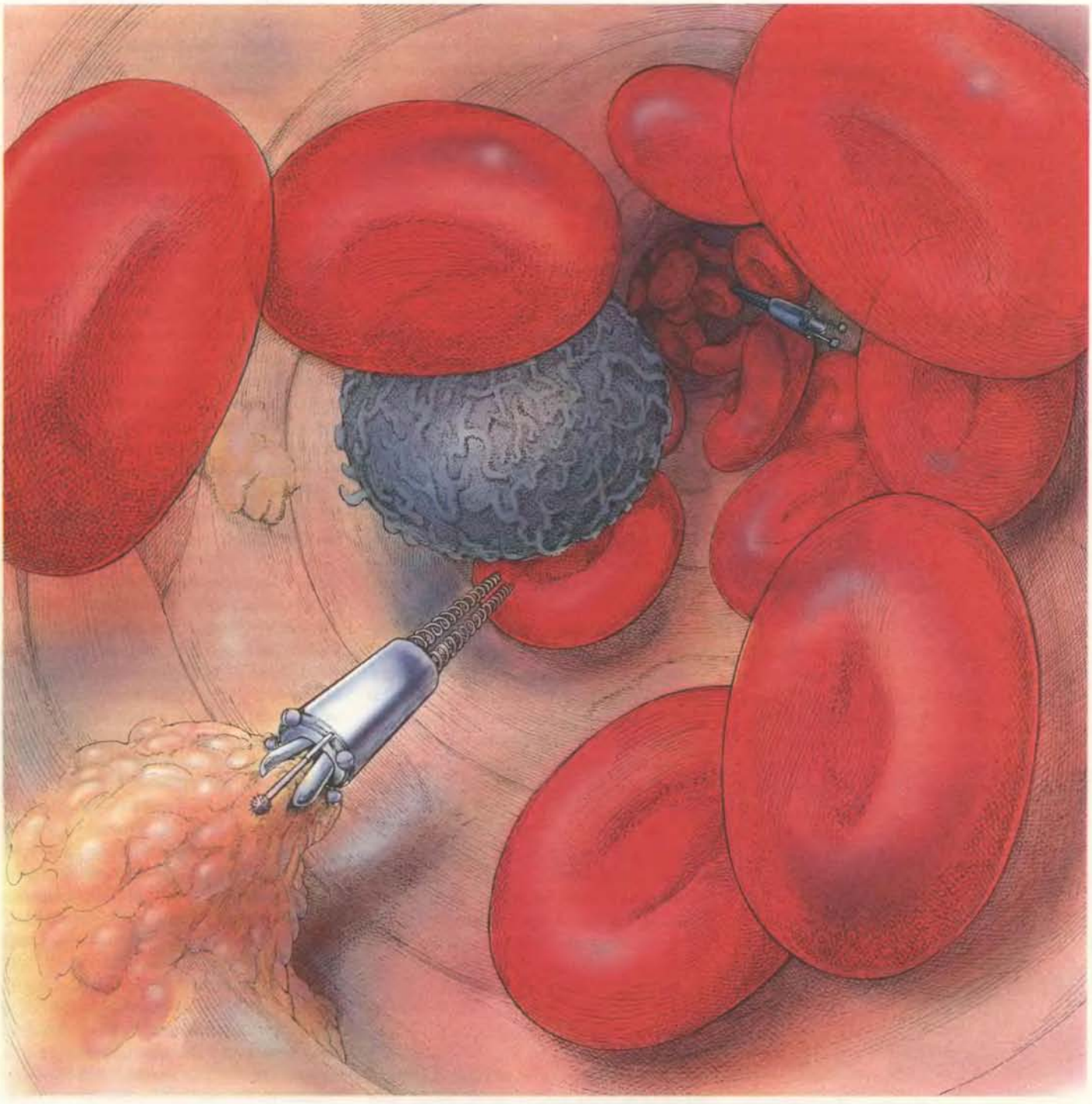
Дрекслер полагает, что проблема трения может быть решена путем использования роликовых подшипников, в которых атомы расположены рядами, чередующимися с такими же рядами роликов в обойме подшипника — кольцевой дорожке, вдоль кото-

WWW.SCIAM-MAGAZINE.NAROD.RU

рой двигается подшипник. Ассемблер, способный манипулировать отдельными атомами таких элементов, как углерод и фтор, может построить подшипник и его обойму из атомов углерода в виде структуры с одной связью, аналогичной структуре алмаза. Подшипник будет представлять собой полый цилиндр. Поверхность подшипника и обоймы будет усеяна атомами фтора, расположенными в виде наклонных рядов (см. рисунок на с. 84). По тому же принципу могут быть построены зубчатые передачи.

Дрекслер рассматривает также проблему трения скольжения между поверхностями атомов. Обладая возможностью располагать атомы по определенным позициям, не нарушая при этом физических законов, можно воспользоваться такими расположениями, при которых силы отталкивания Ван-дер-Ваальса становятся меньше. Например, атом, движущийся вплотную к поверхности, которая состоит из рядов других атомов, расположенных подходящим образом, будет испытывать сравнительно небольшое сопротивление. Однако при этом он должен двигаться по прямому пути непосредственно над желобком между двумя соседними рядами. Дрекслер полон энтузиазма и относительно ряда других идей. С некоторыми из них можно познакомиться лишь в технических отчетах Дрекслера, в которых содержится подробная информация о гипотетических винтиках и гаечках нанотехнологии. Более общий обзор положения дел в этой области можно найти в книге Дрекслера «Двигатели созидания» (Engines of Creation, см. библиографию на с. 96).

Представим на минуту, что создание «подводной лодки», способной передвигаться в кровеносных сосудах, о которой говорилось выше, уже технически возможно. Каким образом можно управлять ею? Конечно, нанокомпьютером, но каким именно?



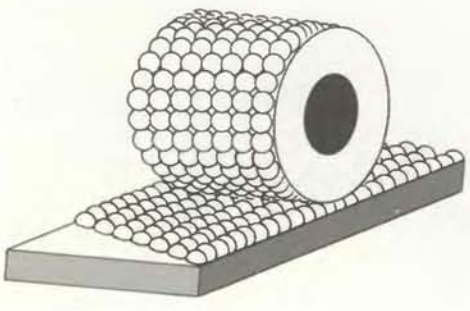
Наномашина, проплывающая по капилляру, атакует жировые отложения

WWW.SCIAM-MAGAZINE.NAROD.RU

Можно воспользоваться электронными компьютерами, говорит Дрекслер, однако сам он сосредоточил свое внимание на механических компьютерах, основанных на элементах так называемой «стерженьковой логики». Хотя логические операции в этих элементах реализуются перемещением молекулярных стерженьков по миниатюрной матрице, их никак не назовешь медленными. В масштабе атомарных размеров такие стерженьки перемещаются из одного положения в другое всего лишь за 50 пс (пикосекунда — одна триллионная часть секунды).

Основной функциональный элемент компьютера — это логический вентиль. На входе его имеется одна или несколько входных линий и одна выходная линия (которая затем может разветвляться на несколько линий). Входные и выходные сигналы бывают двух видов; обычно они обозначаются 0 и 1. Поскольку значение сигнала в одной и той же линии может со временем меняться, каждую линию удобно обозначать переменной величиной, например x. Логическую функцию вентиля можно описать формулой. Например, формула «x и y» соответствует так называемому вентилю И. Выходной сигнал такого вентиля равен 1 тогда и только тогда, когда оба входных сигнала x и y равны 1. Аналогичным образом формула «x или y» описывает функцию вентиля ИЛИ. В данном случае выходной сигнал вентиля равен 1, если хотя бы один из входных сигналов x или y равен 1. Из вентилей двух этих типов, вместе с третьим вентилем НЕ, называемым инвертором, можно построить логическую схему, реализующую любую функцию. Инвертор преобразует сигнал, равный 1, в 0 и, наоборот, равный 0 в 1.

В современных электронных компьютерах схемы логических вентилей собираются на транзисторах микронного размера, формируемых с помощью специальной технологии на поверхности кристалла. Слой обработанного кремния, легированного примесями, отличающимися избытком или недостатком свободных электронов, покрывается слоем поликристаллического кремния. Поверх этих двух слоев обычно располагается еще металлический слой, как правило, из алюминия. Он служит проводником для электрической связи транзисторов. Конечно, не все участки поверхности кристалла содержат все три слоя. Точная структура расположения этих слоев определяется схемой соединения транзисторов. Обычно металлический слой имеет вид сверхтонких полосок алюминия, протягивающихся во всевозможных направлениях по всей поверхности кристалла.



Роликовый подшипник из фторированного алмаза

В таких микросхемах сигналы, проходящие по миниатюрным алюминиевым проводникам, могут принимать два различных уровня напряжения, кодирующих логические значения 0 и 1. Наиболее широко используются вентили типа И-НЕ, которые в терминах простых логических функций, описанных выше, можно представить выражением «НЕ (x И y)». Другими словами, выходной сигнал вентиля И-НЕ равен 1 в том случае, если оба сигнала на входе x и y не равны одновременно 1. Таким образом, если хотя бы один из входных сигналов равен 0, на выходе устанавливается 1. Пользуясь только вентилями И-НЕ, можно реализовать любую логическую функцию независимо от ее сложности.

Микросхемы, конечно, очень малы. Их компоненты имеют размеры несколько микронов (миллионных долей метра). Дрекслер же предлагает нам рассмотреть компьютер, который бы целиком уместился в одном транзисторе кремниевой микросхемы.

Логические функции в гипотетическом нанокомпьютере Дрекслера реализуются с помощью бесконечно маленьких стерженьков, заменяющих проводники с двумя уровнями напряжения, кодирующими логические 0 и 1. Стержень размером в несколько атомов может скользить между двумя возможными положениями. Эти положения можно рассматривать как представления логических значений 0 и 1. Стержень сделан из карбина, цепочки атомов углерода с чередующимися одинарной и тройной связями. Этот стержень оказывается достаточно жестким и прочным, чтобы выполнять свои функции, и все же остается достаточно гибким, чтобы скользить вдоль не очень острых углов. У карбиновых стерженьков имеются образования, которые мы будем называть головками. Они бывают двух видов (см. верхний рисунок на с. 85). Головки одного вида просто выдаются наружу, мы будем называть их зондирующими или тестирующими. Головки другого типа подобны створкам и называются блокирующими.

Основание головок обоих типов образовано шестиугольным пиридазиновым кольцом, прикрепленным с каждой стороны к карбиновой цепочке. Тестирующая головка имеет второе углеродное кольцо поверх пиридазинового. Это внешнее кольцо содержит один атом фтора, который выдвинут вперед и играет роль логического зонда. Блокирующая головка несколько отличается от головки зонда, в частности, тем, что она содержит фторированное тиофеновое кольцо. Впрочем, названия здесь не так важны. В дальнейшем мы просто будем предполагать, что такие структуры могут выполнять функции тестирования и блокирования. Достаточно сказать, что Дрекслер провел подробные вычисления, для освещения которых у нас здесь не хватит места и которые касаются, в частности, напряжений, выдерживаемых стерженьками при тепловом колебании молекул.

Кроме стерженьков логические схемы механического нанокомпьютера состоят также из трехмерной матрицы, построенной из атомов элементов — соседей углерода в периодической таблице. По этой структуре в двух взаимно перпендикулярных направлениях на многих уровнях протягиваются каналы. Каким образом стерженьки реализуют логические функции в этой матрице?

Представим себе один горизонтально расположенный в своем канале стержень, и пусть он находится в одном из двух дозволенных положений. Предположим для простоты, что этот «логический стержень» имеет две тестирующие головки и одну блокирующую (см. нижний рисунок на с. 85). Такой стержень проходит через три замка, полые зоны матрицы, где два стержня (и их головки) пересекаются под прямым углом. При прохождении каждого замка возникает неопределенность, проскользнет ли головка-зонд одного стержня мимо блокирующей головки другого или будет захвачена ею. Из трех замков, через которые может пройти рассматриваемый нами стержень, в двух левых замках находятся блокирующие головки двух вертикальных стержней, обозначенных x и y. Замок, расположенный справа, содержит головку-зонд, прикрепленную к третьему вертикальному стержню f.

Горизонтальный стержень и его замки служат для вычисления логической функции И-НЕ. Два вертикальных стержня слева представляют

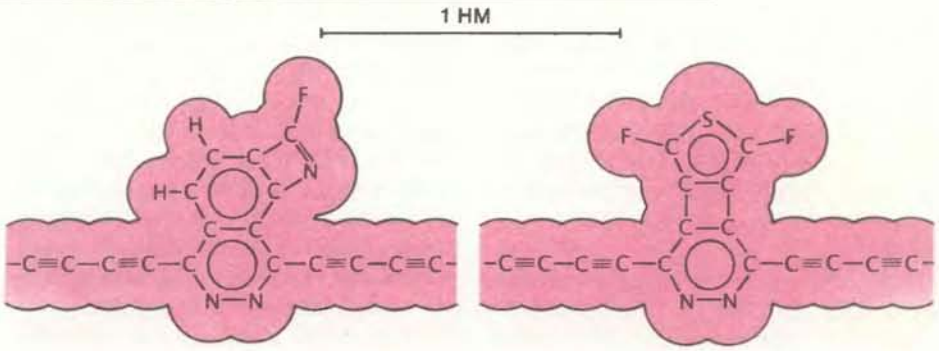
WWW.SCIAM-MAGAZINE.NAROD.RU

входные переменные x и y. Вертикальный стержень справа представляет выходной сигнал операции И-НЕ.

Предполагая, что вертикальный входной стержень представляет логическое значение 0 в верхнем положении и 1 — в нижнем, рассмотрим ситуацию, когда x = 0 и y = 1. Другими словами, стержень x находится в верхнем положении, а y — в нижнем. В этом случае мы не сможем протащить логический стержень влево мимо обоих вертикальных стержней, поскольку x находится в верхнем положении и его блокирующая головка стоит на пути зонда логического стержня. Только если стержень x будет также в нижнем положении, обе тестирующие головки рассматриваемого нами стержня смогут миновать соответствующие блокирующие головки, так чтобы стержень мог беспрепятственно скользить влево.

Ну а что же выходной стержень f? Он может проверить, перешел ли наш логический стержень в свое новое положение, введя свой зонд в замок, содержащий блокирующую головку логического стержня. Когда горизонтальный стержень находится в правом положении, стержень f сможет миновать его, перейдя тем самым из логического состояния 0 в состояние 1. Однако, если логический стержень может проскользнуть в левое положение, его блокирующая головка будет препятствовать тестирующей головке f при ее прохождении через замок и поэтому стержень f будет иметь состояние 0. Таким образом, значение сигнала f будет равно 1, когда x и y оба одновременно не будут равны 1, что и соответствует требованиям функции И-НЕ.

Вычислительный цикл стержневого компьютера Дрекслера разбивается на три отдельные фазы, которые многократно следуют друг за другом с молниеносной быстротой. На первой фазе устанавливаются входные замки, при этом входные стержни временно оттягиваются. Это позволяет всем логическим стержням уйти в исходное положение. Во второй фазе входные стержни занимают свое текущее положение. Они могут соединяться с различными сенсорами наномашины или с выходами самого нанокомпьютера. Затем в едином движении все логические стержни тянутся влево, если можно так выразиться. Наконец, в заключительной фазе определяются значения выходных переменных, когда ко всем выходным стержням прикладывается сила, вынуждающая их двигаться по своим каналам. Перемещаются же лишь те из них, которые оказываются незаблокированными.

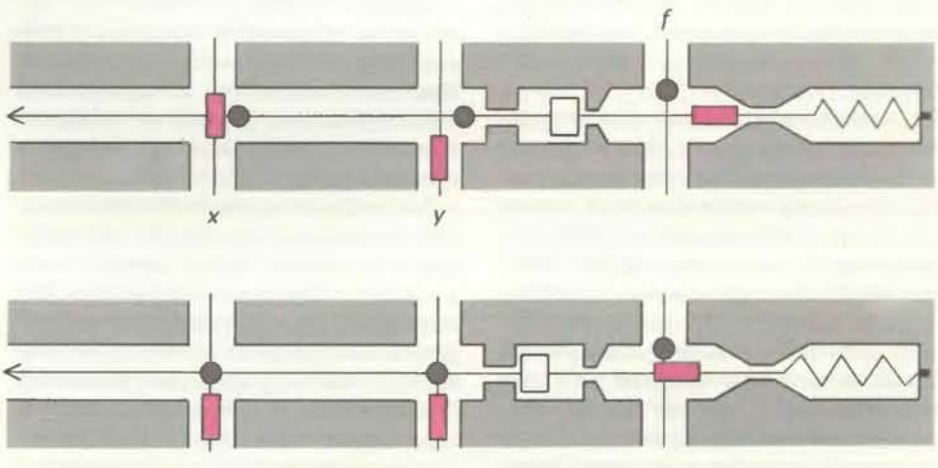


Тестирующая (слева) *и блокирующая* (справа) *головки на карбиновом логическом стержне*

Специалисты, работающие в области искусственного интеллекта, наверняка возразят: даже если допустить, что в таком крошечном объеме можно разместить достаточно большие вычислительные мощности, то каким образом Дрекслер собирается наделить свои микроскопические автономные машины необходимым «интеллектом»?

На подобные возражения Дрекслер отвечает, что хотя в его машины можно встроить очень мощный центральный процессор, некоторые наномашины совсем не обязательно должны обладать значительным интеллектом. Взять к примеру описанный выше нанонаутилус — машину, предназначенную для лечения. Путешествуя по кровеносным сосудам человека, такая наномашина могла бы поглощать из крови глюкозу и кислород. Эти вещества обеспечивали бы машину необходимой энергией. Возможно, что у человека, в крови которого находятся миллиарды нанонаутилусов, время от времени будут возникать едва заметные неприятные ощущения. Во всяком случае, каждая машина будет использовать энергию, получаемую от своих «глюкозных двигателей» (конструируемых в настоящее время) для того, чтобы приводить в движение два спиралевидных пропеллера. Движение машины может быть и неуправляемым. Когда она натыкается на что-нибудь, центральный процессор получает сигнал от нанометрового контактного переключателя в ее передних сенсорах. Затем те же сенсоры используют различные встроенные в них ключи-шаблоны для определения молекулярной структуры препятствия.

Если препятствие окажется клеткой стенки сосуда, красным кровяным тельцем, лейкоцитом или еще каким-нибудь представителем заданного набора объектов, то наномашина на короткое время даст задний ход, а затем продолжит свое путешествие. Если же ей встретится болезнетворная бактерия или вирус, то она раскроет свои механические челюсти и проглотит настолько большой кусок объекта, насколько сможет откусить. К таким объектам относятся также вредные отложения и вообще все то, на что будет запрограммирована наномашина (см. рисунок на с. 83). Проглоченные куски подвергаются искусственному химическому разложению, и продукты переработки, выпущенные в кровь, удаляются впоследствии почками. В кровеносной системе, населенной такими работающими наномашинами, у болезнетворных бактерий и других нежелательных тел бу-



Логический стержень выполняет операцию И-НЕ

WWW.SCIAM-MAGAZINE.NAROD.RU

дут очень маленькие шансы на то, чтобы выжить и просуществовать более нескольких часов.

Конечно, все это мечта — по крайней мере пока. Мы едва достигли порога мира нанотехнологии. Прав ли Дрекслер, утверждая, что нечто подобное этой фантастической мечте осуществится на самом деле? Он упорно защищает свои идеи, иногда несколько изменяя их под влиянием серьезных критических замечаний своих ученых коллег. Однако пока он остается технологом без технологии, эрудированным мечтателем. Наверное, максимум, чего ему удастся достичь, — это внести свой вклад в стимулирование научной мысли — движущей силы нашего технического прогресса. При этом лично он не проявляет слепого оптимизма, отдавая себе отчет в том, что реализация нанотехнологии несет в себе опасности, может быть даже бóльшие, чем атомное оружие или генетические эксперименты, вышедшие из-под контроля.

Один из энтузиастов нанотехнологии недавно сказал мне, что «тысячи из тысяч тех, кто живет сейчас, не умрут никогда». Любопытно, что один верующий говорил то же самое моему отцу полстолетия назад.

В СТАТЬЕ нашей рубрики в ноябрьском номере мы обсуждали программу Рича Голда, которая моделирует на персональном компьютере вечеринку с несколькими приглашенными людьми. Помещение, в котором собираются гости, представляет собой квадратную решетку на экране дисплея. Гости перемещаются с клетки на клетку в поисках наибольшего комфорта. У каждого приглашенного есть своя предпочтительная дистанция по отношению к каждому другому участнику вечеринки. Он (или она) перемещается в том направлении, которое уменьшает чувство дискомфорта в сложившейся на данный момент конфигурации. Чувство дискомфорта вычисляется путем суммирования разностей между предпочтительной и реальной дистанцией по отношению к каждому гостю.

Основной цикл программ был предельно простым. По мнению А. Чарльзворта из Университета шт. Виргиния, такая простота может несколько исказить картину. Чарльзворт занимался изучением параллельных программных систем, называемых системами «мультирандеву». Если бы каждый гость был представлен в виде отдельного процесса на языке параллельного программирования, то «после каждой итерации все такие процессы могли бы проводить "совещание", чтобы поделиться информацией о новом расположении гостей». Однако и в нашей обычной последовательной модели можно избежать искажений, если не перемещать гостей до тех пор, пока степень дискомфорта каждого из них не будет подсчитана.

А. Пенсер из Хантсвилля (шт. Алабама) остался неудовлетворенным по поводу функции, с помощью которой вычисляется степень дискомфортности гостей. Он предпочел бы разности между идеальными и реальными расстояниями возводить в квадрат. Насколько существенными будут отличия в поведении тех же гостей при тех же исходных положениях? Очевидно, силы взаимного притяжения и отталкивания будут значительно сильнее зависеть от расстояния между гостями.

Как я уже говорил в конце своей статьи в ноябрьском номере, существует даже своеобразная наука — проксемика. У. Икингер-младший из Мэрилендского университета построил как-то шестиугольную решетку, которую можно, подобно ковру, расстелить на полу, чтобы наблюдать за расстояниями, разделяющими различных участников сборища. Икингер очень увлечен программами, которые моделируют поведение гостей, и хотел бы связаться со всеми энтузиастами в США, разделяющими его увлечение.

Наука и общество

Белки-виновники

БОЛЕЗНЬ Альцгеймера — заболевание тяжелое и безнадежное. У страдающих им людей развивается слабоумие, они теряют трудоспособность и умирают от различных нарушений жизнедеятельности, обусловленных поражением мозга. В настоящее время в США диагноз «болезнь Альцгеймера» имеют 2 млн. больных и ежегодно 100 тыс. человек умирают от этого заболевания. Выявлены два белка, связанных с болезнью Альцгеймера, — белок A68 и белок β-амилоида. Вначале считалось, что роковую роль играет амилоид, но недавно подозрение пало на белок A68.

Оба белка обнаруживаются в организме взрослого человека в двух случаях — при синдроме Дауна в возрасте старше 35 лет и при болезни Альцгеймера. В мозгу больного белок β-амилоида образует так называемые сенильные бляшки, а белок A68 находится в нейрофибриллярных клубках — скоплениях скрученных филаментов. И бляшки, и клубки способствуют омертвению и разрушению ткани мозга, что проявляется в прогрессирующем слабоумии.

Белок β-амилоида был первым назван ключевым фактором заболевания. А в 1984 г. Дж. Гленнер и его коллеги из Медицинского центра Калифорнийского университета в Сан-Диего показали, что амилоидные бляшки у лиц, страдающих болезнью Альцгеймера, и у больных с синдромом Дауна одинаковы. Вскоре несколько исследователей установили, что ген белка β-амилоида расположен на хромосоме 21, которая при синдроме Дауна присутствует в клетках в количестве трех копий, а не двух, как в норме. Поскольку многие патологические явления при синдроме Дауна считаются связанными с избыточным производством определенных белков, обусловленным наличием лишней хромосомы 21, это давало основание думать, что и болезнь Альцгеймера объясняется дупликацией гена белка β-амилоида, ведущей к перепроизводству белка. Действительно, Ж.-М. Делабар из больницы Некер в Париже сообщил, что обнаружил дупликацию гена белка β-амилоида в образце ткани, взятом у пациента с болезнью Альцгеймера.

Однако этому противоречат сведения, опубликованные недавно в журнале «Science». В трех отдельных исследованиях изучались посмертные образцы крови и ткани мозга более 100 человек, страдавших болезнью Альцгеймера, с целью обнаружить дупликацию гена амилоида или генов, расположенных вблизи него на хромосоме 21. Во всех случаях количество ДНК, кодирующей ген амилоида, оказалось почти таким же, как в контрольных образцах (взятых у людей без малейших признаков болезни Альцгеймера), и было в 1,5 раза меньше, чем у больных с синдромом Дауна. По мнению П. Джорджа-Хислопа из Массачусетской больницы, который провел одно из этих исследований, если дупликация гена белка β-амилоида и происходит, то очень редко и, следовательно, не может быть тесно связана с заболеванием.

Теперь ключевая роль в болезни Альцгеймера отводится белку A68. Согласно П. Дэвису из Медицинского колледжа им. Альберта Эйнштейна